
基于生态足迹的武汉城市圈生态承载力评价和生态补偿研究^{*1}

杨璐迪¹ 曾晨^{2, 3*} 焦利民^{1, 4} 刘钰³

- (1. 武汉大学资源与环境科学学院, 湖北武汉 430079;
2. 华中农业大学土地管理学院, 湖北武汉 430070;
3. 中国科学院地理资源科学与资源研究所, 北京 100101;
4. 武汉大学地理信息系统教育部重点实验室, 湖北武汉 430079)

【摘要】在推进新型城镇化和生态建设的背景下, 客观定量评价区域生态环境状态, 是当前我国生态建设重要而紧迫的任务之一。高密度的人类活动会对自然生态系统产生超负荷的压力, 通过生态承载力的分析能够定量测度这种状况, 为区域可持续发展提供借鉴意义。基于生态足迹模型, 计算了 2008 年和 2013 年武汉城市圈各县域单元的生态足迹/承载力, 并进行了时空变化分析。研究发现武汉城市圈各县域单元的生态足迹和生态承载力在空间上存在显著的差异性, 生态足迹逐年增加, 生态承载力的变化相对较小, 出现两级分化的现象。根据生态足迹/承载力进行跨区县生态补偿测算, 得到 2008 年和 2013 年武汉城市圈 48 个县域的转移支付情况, 表明如果运用财政转移支付的手段, 整个区域能够达到生态系统供给和需求动态平衡的目标, 缓解武汉城市圈的生态压力, 实现武汉城市圈的可持续发展。

【关键词】武汉城市圈; 生态足迹; 生态承载力; 生态补偿; 转移支付

【中图分类号】:X321 **【文献标识码】**:A **【文章编号】**:1004-8227(2017)09-1332-10

DOI:10.11870/cjlyzyyhj201709005

¹ 收稿日期:2016-12-27; 修回日期:2017-03-20

基金项目:国家自然科学基金(41501179) [National Natural Science Foundation of China(41501179)]; 中国博士后科学基金(2015M571109) [China Postdoctoral Science Foundation funded project(2015M571109)]; 华中农业大学自主科技创新基金(2662015PY166) [Independent Science and Technology Innovation Fund Project of Huazhong Agricultural University(2662015PY166)]; 国家自然科学基金(41771563) [National Natural Science Foundation of China(41771563)]

作者简介:杨璐迪(1995~), 女, 硕士研究生, 主要从事城市与生态研究. E-mail:ludyila@whu.edu.cn

***通讯作者** E-mail:lunarzeng@126.com

资源环境承载力的探索是 21 世纪人类社会经济系统和生态环境系统耦合的重要手段^[1]。生态系统完整、资源丰富是人类可持续发展的必要条件。改革开放以来,快速的工业化和城镇化进程严重威胁了生态环境的平衡,影响着社会经济的可持续性发展^[2]。在面临严峻资源环境问题的当下,探索生态承载力的演变具有重要的意义,有利于挖掘自然环境破坏的原因,根据实际情况实施改善措施,实现可持续发展的目标。

近年来,学者对生态承载力的研究方法可分为:自然植被净第一性生产力估测法(NNP)^[3]、综合指标评价法^[4]、生态足迹法^[5]、资源与需求的差量法^[6]、状态空间法^[6]。自然植被净第一性生产力估测法、资源与需求的差量法更偏向于自然方面,综合评价法和状态空间,针对不同的研究对象没有统一的评判标准,而生态足迹法则常用于区域承载力的研究中。1992 年 Wackemagel^[7]首次提出生态足迹法,并在在全球层面上,应用该方法对 52 个国家和地区的生态承载力进行了比较。在城市尺度上, Jennie Moore、E. Blasi 等学者^[8~10]测算分析了各地方的生态足迹,对该区域的生态承载力进行评价。国内学者基于生态足迹模型的生态承载力研究大致可以分为两类:第一类是通过水足迹、碳足迹、旅游足迹等不同物质资源模型研究特定的资源^[11~15],如基于消费量法和碳足迹与碳承载力计算模型对中国大陆 30 个省份的能源碳足迹和碳承载力进行计算并针对区域差异进行分析。第二类是针对区域性的整体研究,龙海峰、熊鹰等学者构建了具有地域特征的指标体系,评估了市县级,区域或省级的生态承载力状态^[16~20],如以黑水县为例,针对不同土地类型测算了生态足迹和生态承载力,得出黑水县总的生态承载力约是总生态足迹的 2.6 倍,这一地区的发展处于可持续阶段。

区域的生态承载力若无法完全支持该区域的人类生产生活,则需要进行生态补偿平衡该区域生态供给与人类生活的需要^[21, 22]。生态补偿是对遭受破坏的生态系统进行修复或者异地重建以弥补生态损失的做法^[23]。生态补偿标准大多通过生态足迹/承载力进行测算^[24],其研究对象多集中于湿地、耕地、草地等^[25~27],如以松花江流域湿地为例,通过分析松花江流域湿地的生态现状,结合生态补偿的案例,探讨松花江流域湿地保护生态补偿机制。也有不少学者在区域或者流域尺度^[28~30]上直接进行了整体性的生态承载力评价和补偿策略的研究,如采用以生态系统服务价值为基础的区域差异化生态补偿估算方法,对中国 14 个集中连片贫困区生态补偿标准进行了估算。生态补偿作为生态文明建设的重要方面,是为有效改善区域生态状况而建立,其主要依托财政转移支付制度^[31]。

总体来看,目前针对区域整体的生态承载力研究多为大中尺度,而忽略了县区单元之间的异质性,并且较少提出量化解决区域生态压力的方法。县域单元是我国城市体系中最基本,也是最为活跃的行政单元。本文主要依托于 2008 年和 2013 年的数据,通过生态足迹模型,计算武汉城市圈 48 个县区级单元的生态承载力状况,针对生态足迹/承载力的结果,测算县区级单元的生态补偿,量化生态盈亏,从而达到生态供需均衡,缓解各行政区的生态压力,对政府制定相关环保政策,调控社会经济发展有着十分重要的现实意义。

1 生态足迹与生态补偿模型

1.1 生态足迹模型

根据 WWF 所出的 Guideline for LPR(2010),生态足迹模型核算包括 6 类土地类型:耕地、草地、林地、渔业用地、碳吸收用地与建设用地。生态足迹表示人类对不同土地类型生产的产品与服务的需求量,该区域提供各类土地的数量就是生态承载力^[32]。其生态足迹的计算公式为:

$$EF = N \times ef = N \times r_j \times \sum_{j=1}^n (aa_i)$$

$$= N \times r_j \times \sum_{j=1}^n (C_i \times P_i) \quad (1)$$

$$EC = N \times ec = N \times \sum_{n=1}^6 (a_n \times r_j \times y_j) \quad (2)$$

$$ED = EC - EF \quad (3)$$

式中:EF 为总的生态足迹;EC 为总生态承载力;N 为人口数;ef 为人均生态足迹,ec 为人均生态承载力;j 所消费商品和投入的类型; r_j 为均衡因子; aa_i 为第 i 种消费项目的人均占有的生物生产面积; C_i 为 i 种商品的人均消费量; P_i 为 i 种消费商品的平均生产能力。n 为生物生产性土地类型, a_n 为各类人均生物生存性土地面积, y_i 为产量因子。

ED 为生态盈余或赤字,当 $ED > 0$ 时,说明该区域表现为生态盈余。这说明该地区土地利用、环境状况较好。当 $ED < 0$ 时,说明该区域表现为生态赤字。该区域处于不可持续发展状态,区域生态压力大。

1.2 生态补偿模型

根据生态经济学的理论,区域之间的物质交换是一个跨越行政边界而存在的持续过程,区域补偿量化是生态补偿中的难点和核心,跨区域的生态补偿额度核算要综合运用生态服务价值、生态足迹和生态承载力的方法来解决^[33]。本文在测算各个县域需要支付或者获得补偿的转移额度时,需要以生态服务价值为基础,生态足迹和生态承载力作为支付或补偿的决定因素,以该区域的 GDP 比例作为经济发展水平的指标来调节整个模型。具体公式如下:

$$E_i = V_i \times R_i \times K_i \quad (4)$$

$$V_i = Q_j \times S_j \quad (5)$$

$$R_i = \frac{GDP_i}{GDP} \quad (6)$$

$$K_i = \frac{ED_i}{EC_i} \quad (7)$$

式中: E_i 为转移额度; V_i 为区县的生态服务价值; Q_j 为某个区县的某种土地类型的单位生态服务价值; S_j 为某个区县的某种土地类型的面积; R_i 为经济调节系数; K_i 为生态盈余系数。

2 数据和研究区概况

2.1 研究区概况

武汉城市圈是以武汉为中心,由武汉及周边 100km 范围内的黄石、鄂州、孝感、黄冈、咸宁、仙桃、潜江、天门 9 个城市构成的区域经济联合体,是湖北省产业和生产要素最密集、最具活力的地区,是湖北省经济发展的核心区域。2013 年,武汉城市圈国土总面积为 58051.9km²,占湖北省国土面积的 31.2%;常住总人口 3073.82 万人,占湖北省常住总人口数的 53%。2015 年 4 月 5 日,《长江中游城市群发展规划》已经国务院批复实施。长江中游城市群涵盖武汉城市圈、环长株潭城市群、环鄱阳湖城

城市群为主体形成的特大型城市群。长江中游城市群正式定位中西部新型城镇化先行区、内陆开放合作示范区和“两型”社会建设引领区，旨在推动中国经济朝着健康稳定的方向发展。

2.2 数据介绍及处理

生态足迹的核算包括生物资源消费和能源消费(表 1)两个部分。从湖北省农村统计年鉴，9 个城市统计年鉴上整理、归纳得到生物资源和能源的消费数据。化石能源用地包括原煤、燃料油、汽油等，每个县域单元的能源消费数据没有录入统计年鉴，所以具体数据是根据该地级市的经济状况计算转换而来的^[34]。

表 1 分县区人均生态足迹核算选取数据

消费产品	选取数据	生产性面积类型
农产品	粮食作物、棉花、油料、糖类、蔬菜及瓜果	耕地
动物产品	牛、猪、羊、家禽、禽蛋、蜂蜜	草地
林产品	油桐籽、板栗、茶叶、水果	林地
水产品	水产品总产量	水域
能源	原煤、煤炭、汽油、煤油、柴油、燃料油、液化石油气	化石燃料用地
能源	电力	建筑用地

生态承载力的计算中生产性土地的实际面积数据来源于 2008 和 2013 年 30 米的空间分辨率的 TM 影像。其中均衡因子(表 2)的数据根据世界自然基金(WWF)公布的《生存星球报告》^[35, 36]来确定。土地的产量因子与生态承载力有着密切联系，所以产量因子需要根据研究区域的产出水平进行调整。根据 2008~2013 年湖北省的谷物平均单产为 6144kg/hm²和谷物世界年均产量，计算出产量因子为 3.71，根据水产品的单产为 5295kg/hm²，计算出产量因子为 176。林地、草地产量变化不大，采用《生存星球报告》中的数据。没有任何地方特意留出化石燃料用地，所以其值取 0。生态足迹和生态承载力计算中所采用的人口数据，为分县区的常住人口。

表 2 均衡因子和产量因子的选取

土地类型	均衡因子	产量因子
耕地	2.8	3.71
林地	1.1	0.91
草地	0.5	0.19
水域	0.2	176
建设用地	2.8	3.71
CO ₂ 吸收	1.1	0

根据生态补偿模型,各县域单元的 GDP 数据来自于各县域的统计年鉴,谢高地 2008 年提出了全国生态系统服务价值的测算结果^[37],因存在地域差异,为使结果更加精确,本文生态服务价值当量表参考曾杰 2014 年的研究成果^[38]。

3 结果和分析

3.1 生态足迹/承载力的时空变化

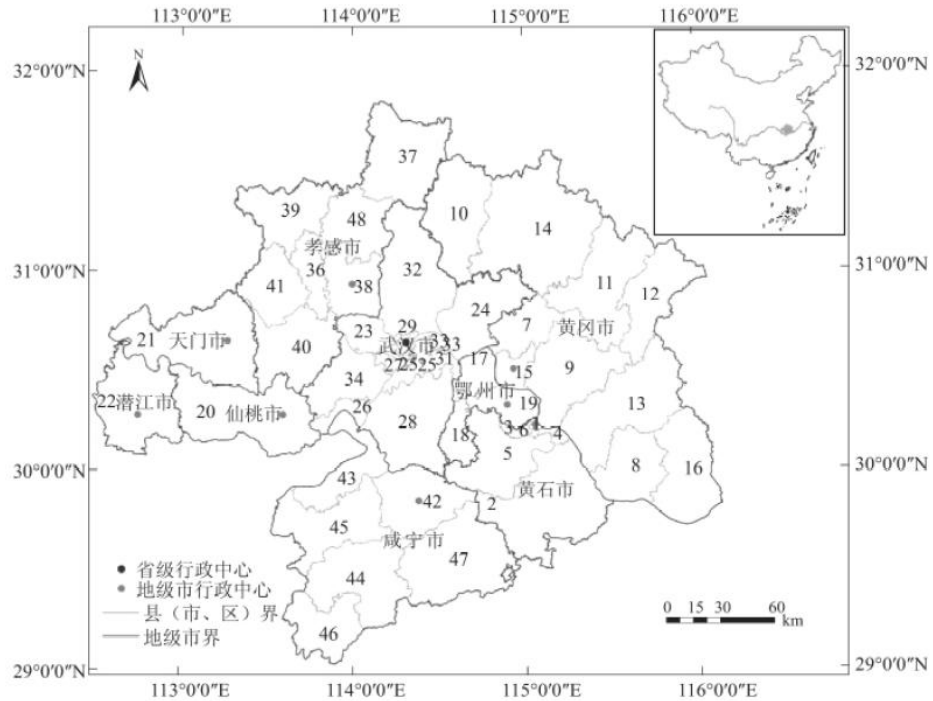
根据生态足迹模型,得出武汉城市圈县域单元 2008 年、2013 年的人均生态足迹/承载力,表 3 中分别列出了排名前三位和最后三位的县域单元,以及 48 个县域单元的平均值。

表 3 武汉城市圈县域人均生态足迹/承载力(hm^2/cap)

县区	生态足迹	县区	生态足迹	县区	生态承载力	县区	生态承载力
	2008		2013		2008		2013
华容区	7.68	华容区	12.44	江夏区	5.086	江夏区	5.514
汉南区	6.47	鄂城区	11.33	梁子湖区	4.811	汉南区	4.711
梁子湖区	5.83	汉南区	10.35	嘉鱼县	4.584	嘉鱼县	4.620
江岸区	1.15	通山县	1.23	娇口区	0.108	娇口区	0.107
通山县	0.89	洪山区	1.05	武昌区	0.089	武昌区	0.093
武昌区	0.79	武昌区	1.02	江汉区	0.072	江汉区	0.066
总平均值	2.70	总平均值	3.74	总平均值	1.93	总平均值	1.95

从表 3 看出,2008 年和 2013 年武汉城市圈中,人均生态足迹最大的均为位于城市圈东南部的华容区,其值分别为 $7.68\text{hm}^2/\text{cap}$ 、 $12.44\text{hm}^2/\text{cap}$,最小的均为位于城市圈中部的武昌区,其值分别为 $0.79\text{hm}^2/\text{cap}$ 、 $1.02\text{hm}^2/\text{cap}$ 。鄂州市的区县单元的生态足迹大,其主要原因是,鄂州的工业非常发达,湖北省最大的地方钢铁基地鄂城钢铁厂坐落于鄂州,鄂州还是鄂东南的重要能源基地。而相比其他区县,鄂州市的区县人口较少。

根据表 3 可以看出,2008 年武汉城市圈中,人均生态承载力最大的为位于城市圈正南位置的江夏区 $5.086\text{hm}^2/\text{cap}$,最小的为城市圈中心位置的江汉区 $0.072\text{hm}^2/\text{cap}$ 。而 2013 年,生态承载力最大最小的县域没有发生改变。生态承载力主要与土地类型与土地面积有关,武汉市主城区的生态承载力较小主要与主城区人口众多,土地类型单一,土地面积小有关。



1. 黄石港区; 2. 阳新县; 3. 铁山区; 4. 西寨山区; 5. 大冶市; 6. 下陆区; 7. 团风县; 8. 武穴市; 9. 浠水县; 10. 红安县; 11. 罗田县; 12. 英山县; 13. 蕲春县; 14. 麻城市; 15. 黄州区; 16. 黄梅县; 17. 华容区; 18. 梁子湖区; 19. 鄂城区; 20. 仙桃市; 21. 天门市; 22. 潜江市; 23. 西湖区; 24. 新洲区; 25. 武昌区; 26. 汉南区; 27. 汉阳区; 28. 江夏区; 29. 江岸区; 30. 江汉区; 31. 洪山区; 32. 黄陂区; 33. 青山区; 34. 蔡甸区; 35. 硚口区; 36. 云梦县; 37. 大悟县; 38. 孝南区; 39. 汉川市; 40. 应城市; 41. 咸安区; 42. 嘉鱼县; 43. 崇阳县; 44. 赤壁市; 46. 通城县; 47. 通山县; 48. 孝昌县

图1 武汉城市圈行政区划图

Fig. 1 Administrative Division of Wuhan Urban Agglomeration

生态承载力的大小,是衡量生态情况的重要指标之一,从总体上看,武汉城市圈的生态情况不容乐观,生态承载力提高的单元数小于生态承载力下降的单元数,并伴随着两极分化的趋势,即生态承载力大的单元,生态承载力稳步提升,生态承载力小的单元,生态承载力进一步恶化。

从图2(a)中可以看出,2008年和2013年生态承载力的空间分布基本一致。以江夏区为中心线,江夏区以东的单元,生态承载力普遍低于江夏区以西的单元。对于江夏区中心线上的武汉市来说,其生态承载力已经不能满足要求,区域可持续发展受到一定的威胁。总体而言,不同地区之间的生态承载力有降有升,所以在一定程度上造成了武汉城市圈生态承载力的空间分异。

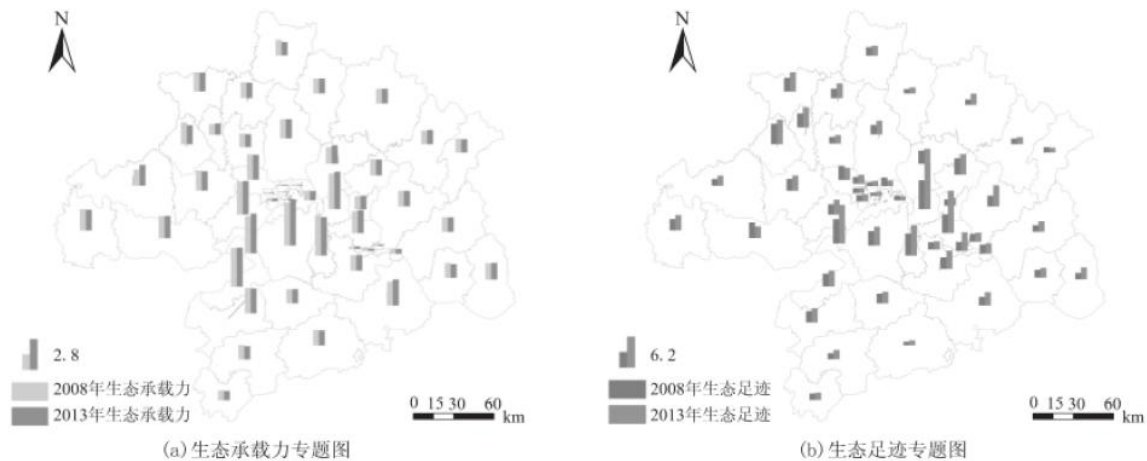


图2 武汉城市圈生态足迹、生态承载力空间分布图

Fig. 2 Spatial Patterns of Ecological Footprint and Ecological Carrying Capacity of Wuhan Urban Agglomeration

根据图 2(b)，可以看出，武汉城市圈的生态足迹分布呈现一个典型的辐射圈，该辐射圈逐步形成环状分布，由华容区为中心，由内向外，逐渐形成减小的梯度分布。武汉城市圈西北县域的生态足迹高于武汉城市圈东南县域的生态足迹。西北及中心地带形成了相对高值的区域，因为其处于江汉平原位置，社会经济发展快速。而武汉城市圈的东南部幕阜山区和东北大别山区的生态足迹较小，这是因为山区人口分布较少，人类活动受自然限制大，从而导致人均生态足迹较小。

3.2 区域生态补偿转移支付测算

根据生态承载力和生态足迹的结果，武汉城市圈的生态发展极不平衡，生态承载力大部分都小于该区域的生态足迹，这些区域需要不断的与外界进行物质交换，才能满足本区域的物质能源需求。所以本文运用生态补偿转移支付，量化“物质交换”，测算支付或者获得支付额度，从而达到区域之间的生态平衡^[39, 40]。根据公式(4)，可以算出武汉城市圈跨县域生态的补偿额度，具体计算结果如表 4 所示。

表 4 武汉城市圈生态补偿转移额度(万元)

县区	生态价值当量		经济系数		生态盈亏系数		转移额度	
	2008	2013	2008	2013	2008	2013	2008	2013
江岸区	7 272.56	5 549.57	0.041 6	0.053 8	-4.002 2	-6.783 7	-1 210.18	-2 024.90
江汉区	586.65	265.34	0.053 9	0.058 4	-23.801 2	-34.982 6	-753.10	-542.43
硚口区	2 022.90	1 472.94	0.042 7	0.036 3	-10.819 2	-11.759 1	-935.10	-628.38
汉阳区	9 932.55	9 185.03	0.053 8	0.054 0	-3.480 8	-4.591 6	-1 858.72	-2 277.83
武昌区	4 478.34	4 366.51	0.057 0	0.055 8	-7.817 6	-9.926 6	-1 997.01	-2 417.44
青山区	2 934.25	2 760.37	0.071 5	0.037 3	-12.511 8	-7.748 9	-2 625.76	-797.42
洪山区	57 272.00	54 529.42	0.048 7	0.048 2	-0.171 6	0.042 5	-478.59	111.75
东西湖区	41 331.18	42 831.50	0.023 4	0.038 6	-0.237 1	-0.063 7	-229.26	-105.26
汉南区	24 988.38	29 263.59	0.006 6	0.007 9	-0.472 6	-1.196 7	-78.09	-277.08
蔡甸区	97 916.48	100 292.67	0.016 8	0.023 7	0.294 3	0.004 6	483.30	10.87

江夏区	190	120.40	186	380.80	0.028	2	0.042	7	0.251	9	0.090	2	1	351.41	718.33
黄陂区	191	859.63	186	948.81	0.028	1	0.035	3	-0.116	9	-0.601	6		-629.86	-3 968.17
新洲区	103	283.43	112	784.35	0.025	7	0.034	5	-0.754	2	-0.793	9	-2	000.33	-3 091.21
大冶市	134	133.56	132	776.16	0.029	5	0.035	4	-0.705	5	-1.706	6	-2	794.41	-8 022.69
阳新县	316	346.20	314	414.73	0.016	8	0.013	1	0.202	6	-0.124	8	1	075.68	-514.97
黄石港	2	808.00	2	677.41	0.013	9	0.010	6	-9.365	1	-11.787	2		-366.47	-334.54
西塞山	13	063.92	12	546.94	0.016	9	0.012	1	-3.386	5	-3.776	9		-746.01	-574.47
下陆区	5	040.39	4	402.85	0.007	8	0.016	7	-4.262	1	-16.933	0		-168.19	-1 245.66
铁山区	1	833.67	1	656.49	0.003	5	0.002	3	-6.604	0	-6.578	6		-42.28	-25.25
黄州区	31	327.10	30	153.55	0.012	7	0.010	9	-0.058	1	-0.257	5		-23.03	-84.60
团风县	74	187.89	74	744.44	0.005	1	0.004	4	-1.263	7	-1.895	7		-482.43	-622.15
红安县	180	870.09	181	772.65	0.008	5	0.007	5	0.308	6	0.041	0		474.72	55.56
麻城市	334	728.81	333	015.34	0.014	6	0.013	7	0.205	1	-0.693	4		999.03	-3 163.14
罗田县	243	520.25	242	103.23	0.007	0	0.006	6	0.081	1	-0.085	1		137.42	-136.05
英山县	169	777.76	169	353.46	0.006	6	0.004	9	0.130	0	0.215	4		144.60	180.05
浠水县	167	639.70	166	852.69	0.013	6	0.011	3	-0.547	0	-2.089	3	-1	245.36	-3 927.72
蕲春县	25	1901.77	250	824.04	0.013	0	0.011	1	0.002	8	-0.583	2		9.04	-1 625.61
武穴市	102	299.35	100	471.82	0.015	3	0.014	0	-0.160	8	-0.581	2		-251.29	-817.97
黄梅县	136	409.93	146	044.02	0.011	8	0.010	3	0.132	2	-0.582	2		212.50	-876.37
咸安区	157	874.40	154	083.29	0.017	3	0.014	3	-0.394	7	-0.808	6	-1	075.90	-1 779.29
嘉鱼县	103	284.78	103	365.49	0.010	4	0.011	9	0.259	8	0.088	6		279.78	109.07
赤壁市	187	312.84	184	913.94	0.017	8	0.019	0	0.028	4	-0.266	9		94.62	-937.20
通城县	119	008.35	117	797.96	0.007	6	0.006	6	-0.480	1	-0.752	4		-437.12	-585.75
崇阳县	227	275.98	226	353.22	0.007	3	0.006	0	0.073	2	-0.561	6		121.60	-762.45
通山县	297	710.96	295	915.22	0.005	8	0.005	4	0.502	0	0.288	5		864.81	461.97
孝南区	66	705.61	65	198.29	0.020	4	0.015	2	-0.106	0	-0.487	8		-144.24	-482.15
孝昌县	81	744.71	80	866.47	0.007	3	0.006	4	-0.340	2	-1.135	5		-201.94	-588.64
大悟县	208	015.86	215	559.62	0.009	0	0.007	1	-0.212	3	-0.596	2		-399.01	-918.33
云梦县	29	038.09	28	293.46	0.013	3	0.011	8	-1.978	4	-2.985	4		-761.47	-996.40
应城县	64	606.05	64	457.28	0.015	6	0.013	6	-1.123	5	-1.923	3	-1	134.03	-1 683.41
安陆市	90	478.27	90	840.24	0.011	4	0.009	7	-0.575	8	-1.334	6		-591.74	-1 179.99
汉川市	111	657.28	110	413.14	0.025	0	0.024	0	-0.328	5	-0.779	3		-918.23	-2 067.55
鄂城区	58	318.03	58	588.11	0.012	3	0.026	9	-0.924	1	-3.176	1		-663.71	-5 001.73
华容区	41	936.97	43	652.34	0.011	5	0.013	3	-0.823	3	-1.811	9		-397.48	-1 053.22
梁子湖区	57	188.51	53	886.70	0.003	5	0.003	5	-0.212	4	-0.769	3		-42.04	-146.64
仙桃市	193	983.96	207	970.88	0.040	6	0.034	5	-0.543	1	-0.183	1	-4	279.89	-1 313.63
天门市	132	140.14	137	253.02	0.032	6	0.024	9	0.068	7	-0.099	6		295.78	-341.17
潜江市	113	446.32	11	4331.44	0.036	9	0.034	3	-0.194	0	-0.661	2		-811.04	-2 593.30

2008 年武汉城市圈的总生态价值当量为 5.24×10^{10} 元，2013 年为 5.25×10^{10} 元。2008 年和 2013 年，生态价值当量最高的均为麻城市，生态价值当量最低的均为江汉区。经济调节系数反应了各个区县在武汉城市圈中的经济水平，其中武汉市的中心城区排名靠前，而铁山区、梁子湖区、团风县、英山县等排名为最后几位。

生态盈余系数决定了，区县应该获得补偿或者支付。若生态盈亏系数为正则说明生态承载力大于生态足迹，就会有多余的部分可以供给其他区县使用，而其他生态盈亏系数为负的区县就应该支付相应的补偿额度给系数为正的区县。2008 年，武汉城市圈中生态盈亏系数为正的区县有 14 个，其中生态盈亏系数排在前列的为通山县、红安县、蔡甸区。生态盈亏系数为负的区县有 34 个，其系数较大的为江汉区、青山区、硚口区等。而到了 2013 年，生态盈亏系数为正的县域单元只剩下 7 个。

2008 年，武汉城市圈的生态补偿空间转移总额为 2.42×10^8 元。其中在 34 个支付区县中，需要支付排名靠前的为仙桃市 4.28×10^7 元，在 14 个补偿区县中，获得补偿最多的为江夏区 1.35×10^7 元。

2013 年，武汉城市圈的生态补偿空间转移总额为 5.89×10^8 元，较 2008 年，整体转移额度增加了 2.5 倍左右，说明武汉城市圈的生态压力日益增加，必须投入更多，才能维持武汉城市圈的生态平衡。按区县看，其中 41 个支付区县中，大冶市需要支付 8.02×10^7 元排在首位，铁山区需要支付 4.23×10^5 元排在最后一位。在 7 个补偿区县中，江夏区、通山县，可获得较多补偿。值得一提的是，洪山区 2008 年需要支付 4.79×10^6 元，而 2013 年洪山区扭亏为盈，可获得 1.12×10^6 元的补偿。

表 4 的转移支付额度代表县区单元为满足该区域的需要而进行的经济补偿或获得，转移支付额度一般需要利用地方政府的公共财政收入覆盖，绿色财政收入为各县区的公共财政收入与转移支付额度抵消结果，并进一步将转移额度与该区县的公共财政收入比较，得出表 5。表 5 中可以发现，2008 年武昌区、硚口区、汉川市、仙桃市、咸安区等地的绿色财政收入排名相比自身公共财政收入排名下降了，说明转移额度对绿色财政收入的影响较大，而 2013 年，除华容区外，各县区的公共财政收入在 2008 年的基础上增加了 3~10 倍不等。2013 年仅有嘉鱼县和安陆市的排名发生对换。转移额度占自身公共财政收入的比例也越来越小，说明转移额度变化的幅度与金额小于公共财政收入。若各县区地方政府按照各县区的需要，投入相应的转移支付数额用于生态建设，那么武汉城市圈的生态压力可得到较大的缓解。

表 5 武汉城市圈绿色财政收入(万元)

县区	绿色财政收人		转移额度占比		县区	绿色财政收人		转移额度占比	
	2008	2013	2008	2013		2008	2013	2008	2013
江岸区	135 478.82	1 155 075.10	-0.89%	-0.17%	英山县	11 018.60	28 468.05	1.33%	0.64%
江汉区	144 525.90	1 432 257.57	-0.52%	-0.04%	浠水县	22 999.64	59 233.28	-5.14%	-6.22%
硚口区	88 770.90	721 271.62	-1.04%	-0.09%	蕲春县	29 280.04	81 426.39	0.03%	-1.96%
汉阳区	82 093.28	823 122.17	-2.21%	-0.28%	武穴市	35 769.71	105 982.03	-0.70%	-0.77%
武昌区	147 280.99	1 335 982.56	-1.34%	-0.18%	黄梅县	31 637.50	74 202.63	0.68%	-1.17%
青山区	84 434.24	555 202.58	-3.02%	-0.14%	咸安区	36 023.10	169 320.71	-2.90%	-1.04%
洪山区	95 237.41	961 711.75	-0.50%	0.01%	嘉鱼县	17 699.78	72 876.07	1.61%	0.15%
东西湖区	148 503.74	119 5094.74	-0.15%	-0.01%	赤壁市	36 241.62	130 291.80	0.26%	-0.71%
汉南区	25 954.91	200 422.92	-0.30%	-0.14%	通城县	12 500.88	46 443.25	-3.38%	-1.25%
蔡甸区	89 599.30	386 710.87	0.54%	0.00%	崇阳县	10 859.60	41 456.55	1.13%	-1.81%
江夏区	104 560.41	564 218.33	1.31%	0.13%	通山县	10 983.81	48 649.97	8.55%	0.96%

黄陂区	118	242.14	578	831.83	-0.53%	-0.68%	孝南区	23	493.76	134	735.85	-0.61%	-0.36%
新洲区	91	056.67	370	208.79	-2.15%	-0.83%	孝昌县	12	908.06	70	195.36	-1.54%	-0.83%
大冶市	59	490.59	304	177.31	-4.49%	-2.57%	大悟县	16	674.99	67	237.67	-2.34%	-1.35%
阳新县	29	510.68	83	985.03	3.78%	-0.61%	云梦县	23	376.53	88	974.60	-3.15%	-1.11%
黄石港区	23	233.53	54	065.46	-1.55%	-0.61%	应城市	33	108.97	118	334.59	-3.31%	-1.40%
西塞山区	15	853.99	57	825.53	-4.49%	-0.98%	安陆市	18	286.26	71	715.01	-3.13%	-1.62%
下陆区	9	831.81	33	554.34	-1.68%	-3.58%	汉川市	41	249.77	141	337.45	-2.18%	-1.44%
铁山区	6	957.72	20	474.75	-0.60%	-0.12%	鄂城区	41	392.29	106	607.27	-1.58%	-4.48%
黄州区	16	046.97	55	915.40	-0.14%	-0.15%	华容区	16	656.52	4	446.78	-2.33%	-19.15%
团风县	10	904.57	35	128.85	-4.24%	-1.74%	梁子湖区	8	952.96	29	941.36	-0.47%	-0.49%
红安县	21	405.72	78	855.56	2.27%	0.07%	仙桃市	37	849.11	208	705.37	-10.16%	-0.63%
麻城市	35	116.03	108	536.86	2.93%	-2.83%	天门市	28	295.78	149	903.83	1.06%	-0.23%
罗田县	14	793.42	44	641.95	0.94%	-0.30%	潜江市	46	314.96	197	442.70	-1.72%	-1.30%

区域生态系统对保障区域的生态安全发挥着重要作用。通过测算生态补偿，定量分析武汉城市圈各县域单元的物质交换。从2008年和2013年的转移额度看，随着社会经济快速发展，环境与发展的矛盾加剧。整体上，武汉城市圈的生态情况有待进一步改善，获得补偿的区县在减少，需要支付的区县在增加，总补偿额度也在增加。目前情况说明当前的生态系统已经无法满足人类活动的需求，需要通过外部的补偿支付来维持区域的和谐健康发展。补偿支付的金额占各地地方政府的财政收入大部分都不到2%，且随着年份的增加，占比更小，如若投入适当的资金，那么对武汉城市圈的健康发展与“两型”社会建设等方面，具有十分重要的意义。

4 结论与讨论

从2008年到2013年，武汉城市圈48个县域的生态足迹逐渐增大，从空间上呈中心向外逐渐减小的梯度分布；生态承载力提高的单元小于生态承载力下降的单元，并伴随着两极分化的趋势，从空间上看，以江夏区为中心线，江夏区以东的单元，生态承载力普遍低于江夏区以西的单元。

通过对生态承载力的分析，发现武汉城市圈的大部分县区均处于超载状况，为解决这种情况，对48个单元进行了生态补偿转移支付测算，从总体上看，2008年，武汉城市圈的生态补偿空间转移总额度为 2.42×10^8 元，2013年为 5.89×10^8 元，较2008年，整体转移额度增加了2.5倍左右。2008年，有34个支付区，14个受偿区。支付区都处于武汉城市圈的中心位置或者是各地级市的中心城市，经济较为发达，而受偿区多集中于武汉城市圈外围和东南部幕阜山区和东北大别山区，因受地理位置和地形的限制，经济发展相对较缓。2013年，随着国家经济的带动，基础设施建设的完善，各县区的生物物质活动更加剧烈，支付区增加到41个，受偿区仅剩7个。在支付区中，除江汉、硚口、青山、黄石港、西塞山等少部分县区外，在5a时间中，其余县区的生态补偿额度均在增加，生态补偿的形式较为严峻。在受偿区中，获得的补偿额度均在减小。转移支付的金额相比各县区的公共财政收入仅占其收入的一小部分，若能投入相应的资金，对武汉城市圈的生态建设与健康发展具有十分重要的意义。

纵看全国，我国已有多个经济区和城市圈，如长江三角洲城市群、长江中游城市群、川渝经济圈等，区域生态系统需要得到保障，区域生态的研究对维持区域可持续发展至关重要。本文从武汉城市圈出发，对区域生态承载力的研究提供了一些参考。本文先是运用生态足迹模型对武汉城市圈的生态足迹/承载力进行时序变化和空间分异的分析，针对各县域单元普遍存在的超载

现象,运用生态补偿模型量化方法。但本文仍有可以值得改进的地方:(1)在生态足迹模型的计算中,因各县区的单个的产量无法获得,根据当地的经济的状况推算得出的。(2)在生态补偿模型的计算中,因计算的是整个区县的转移额度,按照曾杰测算的生态价值当量表,建设用地的生态服务价值为0,完全否定了建设用地的生态价值,这个可能存在一定的误差。

参考文献:

- [1] 孙新章. 中国参与 2030 年可持续发展议程的战略思考 [J]. 中国人口·资源与环境, 2016(1) : 1—7.
- 【SUN X Z. China's strategy to participating in the 2030 agenda for sustainable development [J]. China Population Resources and Environment, 2016(1) : 1—7. 】
- [2] 李爱梅, 康蓉, 杨海真. 快速城镇化地域生态承载力评价模型构建与分析 [J]. 环境科学与管理, 2013, 38(2) : 139—143.
- 【LIA M, KANG R, YANG H Z. Construction of urban ecological carrying capacity evaluation model and its application [J]. Environmental pollution and control, 2013, 35 (3) : 89 —94. 】
- [3] 曾晨, 刘艳芳, 张万顺等. 流域水生态承载力研究的起源和发展 [J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20 (2) : 203—210.
- 【ZENG C, LIU Y F, ZHANG W S, et al. Origination and development of the concept of aquatic ecological carrying capacity in the basin [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2011, 20(2) : 203—210. 】
- [4] 向芸芸, 蒙古军. 生态承载力研究和应用进展 [J]. 生态学杂志, 2012, 31(11) : 2958—2965.
- 【XIANG Y Y, MENG J J. Research and application advances in ecological carrying capacity [J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(11) : 2958—2965. 】
- [5] 方恺. 足迹家族: 概念、类型、理论框架与整合模式 [J]. 生态学报, 2015, 35(6) : 1647—1659.
- 【FANG K. Footprint family: concept, classification, theoretical framework and integrated pattern [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(6) : 1647—1659. 】
- [6] 顾康康. 生态承载力的概念及其研究方法 [J]. 生态环境学报, 2012, 21(2) : 389—396.
- 【GU K K. Concepts and assessment methods of ecological carrying capacity [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(2) : 389—396. 】
- [7] WACKERNAGEL M, REES W. Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the earth [J]. New Society Publishes, 1996.
- [8] JENNIE MOORE, MEIDAD KISSINGER, WILLIAM E. REES. An urban metabolism and ecological footprint assessment of Metro Vancouver [J]. Journal of Environmental management, 2013, 124: 51—61.

-
- [9] MEIDAD KISSINGER, ABRAHAM HAIM. Urban hinterlands the case of an Israeli townecological footprint [J]. Environ Dev Sustain (2008) 10: 391—405.
- [10] BLASI E, PASSERI N. An ecological footprint approach to environmental-economic evaluation of farm results [J]. Agricultural Systems, 145(2016) 76—82.
- [11] 陈文辉, 谢高地, 张昌顺, 等. 北京市消耗食物生态足迹距离 [J]. 生态学报, 2016, 36(4) : 904—914.
- 【CHEN W H, XIE G D, ZHANG C S, et al. The ecological footprint distance of food consumed in Beijing [J]. Acta Ecological Sinica, 2016, 36(4) : 904—914. 】
- [12] 黄雨生, 曲建升, 刘莉娜. 中国各省份碳足迹与碳承载力差异研究 [J]. 生态经济, 2016(6) : 38—43.
- 【HUANG Y S, QU J S, LIU L. Research on the differences of carbon footprint and carbon carrying capacity based on provincial level in China [J]. Ecological Economy, 2016(6) : 38—43. 】
- [13] 李俊, 杜靖川, 夏爽. 新疆那拉提镇旅游生态足迹分析 [J]. 生态经济, 2015(1) : 150—153.
- 【LI J, DU J C, XIA S. Analysis of tourism ecological footprints of nalati town in Xinjiang [J]. Ecological Economy, 2015(1) : 150—153. 】
- [14] 刘莉, 邓欧平, 邓良基, 等. 2003 ~ 2011 年四川省各市(州)农业水足迹时空变化与驱动力研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(7) : 1133—1141.
- 【LIU L, DENG O P, DENG L J, et al. Agricultural water footprint space-time change and driving factors research of various cities in Sichuan Province from 2003 to 2011 [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(7) : 1133—1141. 】
- [15] 焦文献, 陈兴鹏, 贾卓. 甘肃省能源消费碳足迹变化及影响因素分析 [J]. 资源科学, 2012, 34(3) : 559—565.
- 【JIAO W X, CHEN X P, JIA Z. Analysis of energy consumption carbon footprint change and its influencing factors in Gansu Province [J]. Resources Science, 2012, 34(3) : 559—565. 】
- [16] 郭秀锐, 杨居荣, 毛显强. 城市生态足迹计算与分析——以广州为例 [J]. 地理研究, 2003, 22(5) : 654—661.
- 【GUOX R, YANG J R, MAOX Q. Calculation and analysis of urban ecological footprint: a case study of Guangzhou [J]. Geographical Research, 2003, 22(5) : 655—662. 】
- [17] 龙海峰, 赵兵. 基于生态足迹下的黑水县生态承载力分析 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2014, 39(11) : 201—206.

-
- 【LONG H F, ZHAO B. On analysis of ecological capacity in heishui country based on ecological footprint [J]. Journal of Sounthwest China Normal University(Natural Science Edition) , 2014, 39(11) : 202—206. 】
- [18] 熊鹰. 湖南省生态足迹与生态承载力的动态变化分析 [J]. 生态环境学报, 2012, 21(10) : 1683—1688.
- 【XIONGY. Dynamic changes of ecological footprint and ecological capacity in Hunan province [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(10) : 1683—1688. 】
- [19] 尹勇平, 涂利娟, 曾毅. 长株潭城市群土地生态承载力评价研究 [J]. 安徽农业科学, 2009, 37(6) 2660 — 2661, 2693.
- 【YINY P, TUL J, ZENG Y. Evaluation of ecological carrying in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Metropolis [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(6) : 2660—2661. 】
- [20] 田玲玲, 罗静, 董莹, 等. 湖北省生态足迹和生态承载力时空动态研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(2) : 316—325.
- 【TIAN L L, LUO J, DONG Y, et al. Temporal and spatial dynamic research of the ecological footprint and ecological carrying capacity of Hubei Province [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(2) : 316—325. 】
- [21] 戴君虎, 王焕炯, 王红丽, 等. 生态系统服务价值评估理论框架与生态补偿实践 [J]. 地理科学进展, 2012 (7) : 963—969.
- 【DAI J A, WANG H J, WANG H L, et al. Introduction to framework of assessment of the value of ecosystem services [J]. Progress In Geography, 2012(7) : 963—969. 】
- [22] 王振波, 于杰, 刘晓雯. 生态系统服务功能与生态补偿关系的研究 [J]. 中国人口. 资源与环境, 2009(6) : 17 —22.
- 【WANG Z B, YU J, LIU X W. Research on the relationship between ecosystem services and ecological compensation [J]. China Population, Resources And Environment, 2009 (6) :17—22. 】
- [23] CUPERAS J B. Assessing wildlife and environmental values incost benefit analysis: State of art [J]. Journal of Environmental Management, 1996(2) : 8—16.
- [24] 刘春腊, 刘卫东, 徐美. 基于生态价值当量的中国省域生态补偿额度研究 [J]. 资源科学, 2014(1) : 148—155.
- 【LIU C L, LIU W D, XU M. The provincial eco-compensation standard of China based on ecological value equivalents [J]. Resources Science, 2014(1) : 148—155. 】
- [25] 刘子玥, 王辉, 霍璐阳, 等. 松花江流域湿地保护生态补偿机制研究 [J]. 湿地科学, 2015(2) : 202—206.

【LIUZ Y, WANGH, HUO L Y, et al. Mechanism of Ecological Compensation of Wetland Protection in Songhua River Basin [J]. Wetland Science, 2015(2) : 202—206. 】

[26] 赖敏, 吴绍洪, 尹云鹤, 等. 三江源区基于生态系统服务价值的生态补偿额度 [J]. 生态学报, 2015, 35 (2) : 227—236.

【LAI M, WU S H, YIN Y H, et al. Accounting for ecocompensation in the three-river headwaters region based on ecosystem service value [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(2) : 227—236. 】

[27] 杨欣, 蔡银莺, 张孝宇, 等. 基于生态账户的农田生态补偿空间转移研究——以武汉城市圈 48 个县(市、区) 为例 [J]. 自然资源学报, 2015(2) : 197—207.

【YANG X, CAI Y Y, ZHANG X Y, et al. Measurement of farmland eco-compensation and its spatial transfer in Wuhan Metropolitan Area based on ecological account [J]. Journal of Natural Resources, 2015(2) : 197—207. 】

[28] 卢新海, 柯善淦. 基于生态足迹模型的区域水资源生态补偿量化模型构建——以长江流域为例 [J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(2) : 334—341.

【LU X H, KE S G. Establishment of regional water resources ecological compensation model based on ecological footprint model—Take The Yangtze River for example [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin. 2016, 25(2) : 334—341. 】

[29] 许丽丽, 李宝林, 袁烨城, 等. 基于生态系统服务价值评估的我国集中连片重点贫困区生态补偿研究 [J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(3) : 286—297.

【XU L L, LI B L, YUAN Y C, et al. A study on eco-compensation based on eco-service assessment in 14 contiguous destitute areas of China [J]. Journal of Geo-information Science, 2016, 18(3) : 286—297. 】

[30] JOHN REID, AARON BRUNER, et al. Ecological compensation to address environmental externalities: lessons from South American case studies [J]. Journal of Sustainable Forestry, 2015, 34: 605—622.

[31] 廖晓慧, 李松森. 完善主体功能区生态补偿财政转移支付制度研究 [J]. 经济纵横, 2016(1) : 108—113.

【LIAO X H, LI S S. A study on perfecting the financial transfer payment system of ecological compensation in the main functional areas [J]. Economic Review, 2016(1) : 108—113. 】

[32] WWF International. Guideline for 2010 LPR [R]. <http://www.wwfchina.org/>.

[33] 马爱慧, 蔡银莺, 张安录, 等. 两型社会建设跨区域土地生态补偿 [J]. 中国土地科学, 2010(7) : 66—70, 76.

【MA A H, CAI Y Y, ZHANG A L, et al. Land ecocompensation between regions under the framework of constructing resource-saving and environmental-friendly society [J]. China Land Science, 2010(7) : 66—70, 76. 】

-
- [34] 彭继增, 刘逸琨, 王宇昕. 鄱阳湖生态经济区可持续发展评价 [J]. 江西社会科学, 2011(7) : 244—249.
- 【PENG J Z, LIU Y K, WANG Y X. Evaluation on sustainable development of Poyang Lake ecological economic zone [J]. Jiangxi Social Sciences, 2011(7) : 244—249. 】
- [35] WWF. Living Planet Report 2014 [R]. 2014.
- [36] WWF. China Ecological Footprint Report 2012 [R]. 2012.
- [37] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法 [J]. 自然资源学报, 2008(5) : 911—919.
- 【XIE G D, ZHEN L, LU C X, et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China[J]. Journal of Natural Resources, 2008(5) : 911—919. 】
- [38] 曾杰, 李江风, 姚小薇. 武汉城市圈生态系统服务价值时空变化特征 [J]. 应用生态学报, 2014(3) : 883—891.
- 【ZENG J, LI J F, YAO X W. Spatio-temporal dynamics of ecosystem service value in Wuhan Urban Agglomeration [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014(3) : 883—891. 】
- [39] 卢洪友, 杜亦譔, 祁毓. 生态补偿的财政政策研究 [J]. 环境保护, 2014(5) : 23—26.
- 【LU H Y, DU Y X, QI Y. Study on fiscal policy of ecological compensation [J]. Environmental Protection, 2014 (5) : 23 —26. 】
- [40] 徐庆. 论生态补偿转移支付制度的建构 [J]. 长江大学学报(社科版), 2015(12) : 31—33, 46.
- 【XU Q. On the construction of the ecological compensation and transfer payment system [J]. Journal of Yangtze University(Social Sciences), 2015(12) : 31—33, 46. 】